

## UTILIZACION DE CILINDROS SIMPLES Y DOBLES EN LA DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACION EN UN SUELO ARGIUDDL VERTICO

A. Troha y R.A. del Barrio (1)

Recibido: 26-8-86

Aceptado: 27-11-86

### RESUMEN

Se estudió la determinación de la capacidad de infiltración de agua en un suelo Argiudol vértico mediante la utilización de cilindros simples de distintos diámetros y su comparación con los valores obtenidos mediante el empleo del método del doble cilindro.

La utilización de cilindros simples dió por resultado valores de velocidad de infiltración excesivos, debido al movimiento lateral incontrolado de agua por debajo de los mismos.

A partir de los valores de infiltración básica y tiempo básico obtenidos utilizando los cilindros simples, se desarrolló una fórmula que permite determinar la curva de infiltración y la infiltración básica correspondientes a un cilindro doble.

### USE OF SINGLE AND DOUBLE CYLINDER INFILTRMETERS ON SOIL INFILTRATION CAPACITY MEASUREMENT IN A VERTIC ARGIUDDL SOIL

### SUMMARY

It was studied vertic Argiudoll soil water infiltration capacity determinations using single cylinder infiltrometers of different sizes in comparison to double cylinder results.

The use of single cylinders led to excessive infiltration rates due to the incontrolled lateral movement of water beneath the boundary plate.

Starting from basic infiltration rate and basic time of single cylinders, it was developed an equation to calculate infiltration curve and basic infiltration rate of a double cylinder.

---

(1) Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CONICET). Serrano 665.

(1414) Buenos Aires. -Argentina-

Trabajo expuesto en el XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Neuquén, Setiembre 1986.

## INTRODUCCION

Entre los componentes del balance de agua del suelo, uno de los más importantes y menos estudiados en la Argentina es el correspondiente a la capacidad de infiltración del agua edáfica.

La principal utilidad que reporta el conocimiento de este parámetro a partir de un enfoque agrohidrológico, radica en su contribución para la determinación de la efectividad bioambiental de las precipitaciones, es decir, la cantidad de agua que se infiltra y retiene el suelo y los volúmenes de agua que al no infiltrarse producen un arrastre mecánico del suelo superficial (Troha, 1978; Troha y del Barrio, 1984).

La generalidad de los trabajos sobre el tema realizados en la Argentina (Fernández et al., 1971; Medina Aguilar, 1986; Convenio C.F.I. -Provincia de Buenos Aires, 1981; Bermejo y Suerro, 1981; Mendía, 1984; del Barrio, 1984; Troha y del Barrio, 1984) utilizaron como método de medición el sistema del doble cilindro (Haise et al., 1965) que presenta, independientemente de sus ventajas y limitantes intrínsecas, dificultades de tipo operativo para realizar estudios a campo con un número suficiente de repeticiones (del Barrio, 1984; Troha y del Barrio, 1984).

En algunos trabajos realizados en el extranjero se ha tratado de simplificar la metodología de medición de la capacidad de infiltración de agua en los suelos empleando cilindros simples de infiltración (Burgy y Luthin, 1956 y 1957). Esta metodología produjo un grado considerable de variabilidad en los registros obtenidos, debido especialmente al movimiento lateral incontrollado de agua por debajo de los límites del cilindro.

Sin embargo, en los últimos quince años se han desarrollado métodos de corrección de este fenómeno que permiten obtener buenos resultados prácticos y mucha mayor simplicidad operativa (Hills, 1971; Tricker, 1978; Wilcock y Essery, 1984).

Por ello y dado que el tema no se estudió en la Argentina, se consideró de interés un análisis comparativo de mediciones de capacidad de infiltración de suelos con cilindros simples y dobles.

Los objetivos fundamentales de este trabajo fueron la determinación del menor tamaño de cilindro simple que permitiera obtener resultados con un nivel de seguridad comparable a las mediciones con doble anillo y, en segundo término, obtener un procedimiento para corregir las diferencias entre ambos métodos ocasionada por el movimiento lateral de agua por debajo del cilindro simple.

## MATERIALES Y METODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en el campo experimental del Observatorio Agrometeorológico de Castelar (INTA) sobre un suelo Argiudol vértico.

Las mediciones de capacidad de infiltración se realizaron utilizando infiltrómetros de doble cilindro, de acuerdo a las dimensiones propuestas por Haise et al., (1965) e infiltrómetros de cilindro simple de distintos diámetros: 7,5;10;15;20;30 y 45 cm.

Se efectuaron nueve repeticiones con cada tipo de cilindro, tomándose la mediana como valor representativo de la tendencia central del fenómeno analizado.

Para evitar los inconvenientes derivados del instrumental utilizado, los ensayos se realizaron sobre una pradera con cobertura total a fin de disminuir el error cometido por agregar el agua en forma de lámina y no como precipitación, incorporando además una altura de lámina de agua

pequeña para minimizar el error ocasionado por la carga hidráulica. También se tuvo especial cuidado de no perturbar el suelo durante el clavado de los cilindros.

En cada ensayo se midió la velocidad de infiltración en  $\text{mm.h}^{-1}$  a intervalos regulares de tiempo que fueron más cortos al comienzo para luego hacerse más espaciados.

Los valores observados de velocidad de infiltración fueron ajustados por la derivada primera de la fórmula exponencial de Kostiaikov (1932)-Lewis (1937); ecuación empírica que había mostrado ya muy buen ajuste en trabajos anteriores para suelos similares (del Barrio, 1984).

Se debe indicar que las repeticiones efectuadas con un mismo tipo de cilindro correspondieron a situaciones temporales diferentes partiéndose, por lo tanto, de contenidos iniciales de humedad del suelo distintos. Al respecto, se ha demostrado reiteradamente que el contenido de humedad del suelo sólo es relevante durante los estadios iniciales de la infiltración, haciéndose despreciable su influencia cuando el perfil se ha humedecido a saturación (Philip, 1957 y 1969; Hills, 1971 y Tricker, 1981) y se ha llegado a la infiltración básica. Este valor es el que reviste mayor importancia desde el punto de vista agrohidrológico y para el análisis comparativo de distintas situaciones.

Por ello, se determinaron las tasas de infiltración básica y el tiempo que se tardó en arribar a dichos estados estacionarios (tiempo básico), con el empleo del doble cilindro y con los cilindros simples de distinto diámetro, utilizándose en todos los casos el criterio sustentado por Fernández et al., (1971).

Finalmente, se realizó un estudio comparativo entre las velocidades de infiltración en función del tiempo obtenidas por el doble cilindro con las correspondientes a cada diámetro de cilindro simple. Ello permitió establecer un método de corrección para

transformar las tasas de infiltración en función del tiempo obtenidas con cualquier cilindro simple a sus homólogas correspondientes al doble cilindro y, directamente relacionado a esto, se pudo establecer el tamaño mínimo de cilindro simple a utilizar compatible con esta metodología de corrección del efecto del movimiento lateral de agua por debajo del anillo simple.

## RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro N° 1 se pueden observar los valores de infiltración básica mediana y el tiempo básico respectivo para el doble cilindro y cada uno de los cilindros simples utilizados.

La infiltración básica obtenida con los distintos cilindros simples disminuye desde los diámetros menores a los mayores, aunque presenta un valor casi constante para los diámetros de 10, 15, 20 y 30 cm.

Por el contrario, los tiempos expresados en minutos para llegar a esa infiltración básica, son menores para el doble cilindro y cilindros simples muy pequeños y muy grandes, aumentando hacia los diámetros medios (15 a 30 cm de diámetro).

Como primera aproximación se trató de obtener un factor de corrección que afectara a las tasas de infiltración básica medidas con los anillos simples y que permitiera obtener, a partir de las mismas, la infiltración básica del doble cilindro. Los resultados se observan en el Cuadro N° 2.

Este factor de corrección es muy semejante para cilindros simples comprendidos entre 10 y 30 cm de diámetro, lo que permitiría utilizar cualquiera de dichos cilindros indistintamente.

Además del análisis de las curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo, pudo observarse que las pendientes de las mismas son muy similares luego de 180 minutos de ini-

**Cuadro N° 1: Valores de infiltración básica mediana y tiempo básico para el doble cilindro y los cilindros simples de distinto diámetro.**

diámetro de los cilindros simples (cm)	infiltración básica (mm.h <sup>-1</sup> )	tiempo básico (min)
7,5	19,0	201
10	12,3	241
15	12,2	419
20	12,2	415
30	11,1	416
45	7,6	263
doble cilindro	4,2	233

**Cuadro N 2: Factores de corrección aplicados para calcular la tasa de infiltración básica de un doble cilindro a partir de las tasas de infiltración básica medidas con cilindros simples de distinto diámetro.**

diámetro de los cilindros simples (cm)	infil. básica cilindros simples (mm.h <sup>-1</sup> )	factor de corrección	infiltración básica doble cilindro (mm.h <sup>-1</sup> )
7,5	19,0	0,22	4,2
10	12,3	0,34	4,2
15	12,2	0,34	4,1
20	12,2	0,34	4,1
30	11,1	0,38	4,2
45	7,6	0,55	4,2

ciado el ensayo cualquiera fuese el cilindro utilizado y que varían entre -0,012 y -0,021, calculándose el promedio de las mismas en un valor de -0,0157.

Teniendo en cuenta esta última observación se desarrolló una fórmula que permite calcular la tasa de infiltración en función del tiempo (expresada en mm.h<sup>-1</sup>), a partir de los 180 minutos de iniciado el ensayo, correspondiente a un doble cilindro, teniendo como datos la infiltración básica y el tiempo básico del anillo simple.

La fórmula tiene la siguiente expresión:

$$I_t = ((t - t_b) \cdot (-0,0157) + I_b) \cdot f$$

donde:

$I_t$ : tasa de infiltración esperada del doble cilindro para tiempos iguales o mayores a 180 minutos (mm.h<sup>-1</sup>),

$I_b$ : tasa de infiltración básica del anillo simple (mm.h<sup>-1</sup>),

$t$ : tiempo (min). Igual o mayor a 180 minutos,

$t_b$ : tiempo básico del anillo simple (min),

$f$ : factor de corrección para calcular las tasas de infiltración en función del tiempo de un doble cilindro a partir de las tasas de infiltración en función del tiempo de cilindros simples de distintos diámetros.

**Cuadro N° 3: Velocidad de infiltración calculada según la metodología propuesta utilizando tiempos relativos a partir del tiempo básico de cada anillo simple respectivamente.**

tiempo (min)	tasa de infiltración (mm.h <sup>-1</sup> )						
	diámetro de cilindro simple (cm)						doble cilindro
	7,5	10	15	20	30	45	
T.B.-60	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6	4,6	4,7
T.B.-30	4,3	4,3	4,3	4,3	4,4	4,3	4,4
T.B.	4,2	4,2	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2

En el Cuadro N°3 puede observarse la aplicación del método aquí propuesto a los valores de velocidad de infiltración obtenidos con cilindros simples de 7,5; 10; 15; 20; 30 y 45 cm de diámetro para estimar los valores obtenibles utilizando el doble cilindro.

Puede comprobarse la gran similitud existente entre los valores de velocidad de infiltración, en función del tiempo observados con doble cilindro luego de 180 minutos de iniciado el ensayo, con los esperados a partir de la aplicación de la fórmula de corrección aquí propuesta para los cilindros simples.

Debe señalarse que la desuniformidad en los tiempos básicos determinados para cada cilindro utilizado, imposibilitó el empleo de los tiempos absolutos para visualizar las bondades del método de corrección propuesto, adoptando como unidades temporales a fines comparativos los tiempos relativos equiespaciados a cada tiempo básico respectivo.

### CONCLUSIONES

1- Las tasas de infiltración en función del tiempo obtenidas utilizando cilindros simples son significativamente superiores a las obtenidas con doble cilindro. Cuanto menor es el diámetro del cilindro simple, mayor es la diferencia.

2- La variabilidad de los cilindros simples es mayor que la de los cilindros dobles, por ello se recomienda realizar numerosas repeticiones y elegir la observación mediana. La variabilidad es especialmente grande para los anillos de 7,5 cm de diámetro, por lo cual no se recomienda su uso.

3- Es posible estimar la infiltración básica probable de un doble cilindro a partir de la infiltración básica de un cilindro simple afectado por un factor de corrección. Dicho factor es prácticamente igual para diámetros de cilindro simple entre 10 y 30 cm.

4- El método de corrección propuesto permite calcular, además, las curvas de velocidad de infiltración en función del tiempo de un cilindro doble luego de 180 minutos de iniciado el ensayo, a partir de la infiltración y tiempo básicos de cilindros simples de diversos diámetros.

### AGRADECIMENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al personal del Observatorio Agrometeorológico de Castelar (INTA) por la colaboración brindada que ha hecho posible la realización del presente trabajo.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) BERNEJO, B.M. y E.E. SUERO, 1981. Infiltración en suelos argiúdoles de Balcarce. *RIA*, 16 (2):205-213.
- 2) BURG, R.H. and J.W. LUTHIN, 1956. A test of single and double ring infiltrometers. *Trans. Am. Geophys. Union*, 37:189-192.
- 3) BURG, R.H. and J.W. LUTHIN, 1957. Discussion of a test of single and double ring infiltrometers. *Trans. Am. Geophys. Union*, 38:260-261.
- 4) CONVENIO CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES- Provincia de Buenos Aires, 1980. Estudio de la zona deprimida del Salado. Tirada Interna.
- 5) DEL BARRIO, R.A., 1984. Infiltración de agua en suelos de la región pampeana. *Rev. Facultad de Agronomía*, 5(3):183-191.
- 6) FERNANDEZ, P.C.; J.A. LUQUE y J.D. PAOLONI, 1971. Análisis de la infiltración y su aplicación para diseños de riego en el valle inferior del río Colorado. *RIA*, Serie 3. Clima y suelo 8(1):1-29.
- 7) HAISE, H.R.; W. DONNAN; J. PHELAN; L.F. LAWSON and D.G. SHOCKELY, 1965. Uso del infiltómetro del cilindro para determinar las características de infiltración de los suelos irrigados. El Servicio de Investigaciones Agrícolas del Opto. de Agr. de los E.E.U.U.-Traducido en informe A.R.S.41.7 United States Department of Agriculture. 10p.
- 8) HILLS, R.C., 1971. Lateral flow under cylinder infiltrometers: a graphical correction procedure. *J. of Hydrology*, 13:152-163.
- 9) KOSTIAKOV, A.M. 1932. On dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessities for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration (en ruso). In *International Sec. of Soil Sci.*, 6<sup>o</sup> Cam. Trans., Groningen Holland V.A. :17-21.
- 10) LEWIS, M.R., 1937. The rate of infiltration of water in irrigation practice. *Trans. Am. Geophys. Union*, 18(2):361-368.
- 11) MEDINA AGUILAR, A.M., 1976. Influencia de algunos factores físicos y del manejo sobre la infiltración de un Brunizem. Tesis para optar al título de Magister Scientiae. Escuela de Graduados en Ciencias Agropecuarias. INTA, Castelar, Buenos Aires. 68p.
- 12) MENDIA, G.M. y C.M. LITWIN, 1984. Consideraciones preliminares entre la velocidad de infiltración y ciertas características de los suelos en la zona deprimida del Salado. Presentado en las Jornadas Científico-Técnicas sobre modelos matemáticos e hidrológicos para grandes llanuras y su aplicabilidad a la zona deprimida del Salado. La Plata, 29 al 31 de octubre de 1984.
- 13) PHILIP, J.R., 1957. The theory of infiltration: 5. The influence of initial moisture content. *Soil Sci.*, 84(4):329-339.
- 14) PHILIP, J.R., 1969. The theory of infiltration. *Advan. Hydroscience*, 5:216-296.
- 15) TRICKER, A.S., 1978. The infiltration cylinder; some comments on its use. *J. of Hydrology*, 36:383-391.
- 16) TRICKER, A.S., 1981. Spatial and temporal patterns of infiltration. *J. of Hydrology*, 36:383-391.
- 17) TROHA, A., 1978. efectividad de las precipitaciones en la Región Pampeana. Traller Argentino-Estadounidense sobre Sequías. Mar del Plata (en prensa).
- 18) TROHA, A., y R.A. del BARRIO, 1984. Infiltración de agua en suelos de la cuenca deprimida del río Salado (Provincia de Buenos Aires). *Rev. GEOACTA* (en prensa).
- 19) WILCOCK, D.W. and C.I. ESSERY, 1984. Infiltration measurements in a small lowland catchment. *J. of Hydrology*, 74:191-204.

# VARIABILIDAD EN LAS MEDICIONES DE HUMEDAD EDAFICA OBTENIDAS POR EL METODO GRAVIMETRICO Y LA SONDA DE NEUTRONES\*

R.A. del Barrio y A. Troha (1)

Recibido: 26-8-86

Aceptado: 9-1-87

## RESUMEN

Se estudió para un suelo Argiudol vértico, la variabilidad de las mediciones de humedad edáfica obtenidas por el método gravimétrico y el número mínimo de repeticiones a realizar por el mismo de acuerdo a distintos niveles de aceptabilidad en situaciones de suelo saturado e insaturado.

Se analizaron para el caso de mediciones de humedad edáfica con sonda de neutrones los errores de calibración, posición y conteo determinando el error total cometido por este método.

## SOIL MOISTURE MEASUREMENTS VARIABILITY ACHIEVED BY GRAVIMETRIC METHOD AND NEUTRON MOISTURE METER

## SUMMARY

It was studied soil moisture measurement variability on a saturated and non saturated vertic Argiudoll soil using gravimetric method and it was assessed the minimum number of replications based on different levels of acceptability.

The inaccuracies of measurements of soil water content made with neutron moisture meter including calibration, location and counting errors were analyzed and the total error was determined.

## INTRODUCCION

El contenido de agua en el suelo ha sido motivo de estudio e investigación desde mucho tiempo atrás debido, fundamentalmente, a la importancia que el conocimiento de la variación temporoespacial de este elemento tiene en la planificación del uso del agua por los diversos ecosistemas (Holmes, 1964; Sartz, 1972).

Las determinaciones de humedad del suelo utilizando el método gravimétrico tuvieron y aún tienen amplia difusión, especialmente por su mayor precisión. Sin embargo, es un método engorroso en cuanto a su aplicación ya que debe realizarse la extracción de las muestras, provocando además la consiguiente alteración del suelo (Forte Lay et al., 1985).

Es por ello que se ha tendido a utilizar métodos no destructivos para

\* Trabajo aceptado para su presentación en el XI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Neuquén, Setiembre 1986.

(1) Centro de Investigaciones Biometeorológicas (CONICET) Serrano 669, (1414) Buenos Aires -ARGENTINA-

determinar la humedad del suelo, siendo de amplia difusión la sonda de neutrones por su rapidez, buena precisión y multiplicidad de aplicaciones (Belcher et al., 1950; Van Bavel, 1958, 1962; Bell, 1969). Sin embargo, para una buena estimación de la humedad del suelo por medio de la sonda de neutrones es necesaria su calibración, especialmente en suelos arcillosos, mediante determinaciones simultáneas con el método gravimétrico. De allí que todo error cometido en este método es acumulado al método radioisotópico.

Además, la exactitud de las determinaciones *in situ* de la humedad edáfica se ve dificultada por la heterogeneidad de los suelos dentro del área experimental. Es por ello que resulta de sumo interés conocer y cuantificar los componentes de variación que influyen las mediciones de humedad a campo.

Los estudios de variabilidad en las mediciones de humedad de suelo, ya sea obtenidos por el método gravimétrico o empleando la sonda de neutrones, son numerosos en el ámbito internacional (Hewlett et al., 1964; Sartz 1972; Sinclair y Williams, 1979; Schudel, 1983).

Sin embargo, a pesar de la importancia del tema no existen antecedentes de relevancia en la Argentina. La Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires ha realizado un estudio sobre variabilidad por la aplicación del método gravimétrico en el campo experimental del Observatorio Agrometeorológico de Castelar (INTA), sobre un suelo Argiudol vértico saturado (Szentivanyi, 1984) y no saturado de humedad (Smith, 1982).

Una parte de los datos obtenidos en dicho estudio son analizados en el presente trabajo, adicionándoles observaciones gravimétricas propias realizadas en el mismo predio e incluyendo un análisis de variabilidad en las mediciones de humedad de suelo obtenidas con la sonda de neutrones.

## MATERIALES Y METODOS

Los ensayos se llevaron a cabo en el campo experimental del Observatorio Agrometeorológico de Castelar (INTA) sobre el mismo suelo.

### a) Método gravimétrico

Para estudiar la variabilidad de las mediciones obtenidas por el método gravimétrico se analizaron las observaciones efectuadas por la Cátedra arriba citada que corresponden a contenidos de humedad de suelo cada 10 cm hasta 1 m de profundidad en suelos saturados e insaturados. Se efectuaron 36 repeticiones por profundidad, advirtiéndose una variabilidad muy marcada en los primeros 20 cm de un suelo saturado y en todo el perfil de un suelo no saturado.

En el presente trabajo se efectuaron mediciones de humedad de suelo por el método gravimétrico de los primeros 20 cm de profundidad en un suelo saturado (36 repeticiones por profundidad) y hasta 1 m de profundidad en suelo insaturado. En este último caso se efectuaron 13 repeticiones por profundidad por ser materialmente imposible realizar más en un mismo día.

Se realizó un análisis de varianza de doble entrada para detectar variabilidad entre repeticiones en una misma profundidad y entre profundidades para una misma repetición.

Para cada profundidad se obtuvo el contenido de humedad medio y el desvío típico de ese valor.

Aceptando que el intervalo de confianza del 95% para el contenido medio de humedad del suelo ( $\bar{X}_i$ ) de cada profundidad (*i*) está dado por:

$$\bar{X}_i \pm 2\sqrt{S_e}$$

es decir,  $\bar{X}_i \pm 2\sqrt{S_i^2/n}$ , siendo  $S_i$  el desvío típico del contenido medio de humedad  $\bar{X}_i$  y *n* el número de muestras. La amplitud del intervalo de confianza del 95%  $\bar{X}_i$  a  $\bar{X}_i$  está dado



por:

$$4\sqrt{S_1^2/n} \quad (1)$$

Para cada profundidad se establecieron tres niveles de error  $\bar{X}_i \pm 5\%$ ;  $\bar{X}_i \pm 7,5\%$  y  $\bar{X}_i \pm 10\%$  cir:

$$\bar{X}_i \pm 5\%; \bar{X}_i \pm 7,5\% \text{ y } \bar{X}_i \pm 10\% \quad (2).$$

Aplicando (1) desde  $n=1$  hasta  $n$ , y relacionando los resultados con los niveles de aceptabilidad dados en (2), se determinaron para cada profundidad y, dentro de ellas, para cada nivel de aceptabilidad, el número mínimo de muestras de suelo a tomar por el método gravimétrico.

#### b) Sonda de neutrones

Para la realización del presente trabajo, se utilizó un equipo Troxler modelo 1255, previamente calibrado.

Para estudiar la variabilidad de los resultados obtenidos por la utilización de esta metodología, se efectuaron 13 repeticiones de observaciones de humedad de suelo cada 10 cm hasta 1 m de profundidad, en un suelo insaturado a partir de los 20 cm.

Se trabajó sobre suelo no saturado por ser, de las dos alternativas posibles, la que había mostrado mayor variabilidad al aplicar el método gravimétrico. Por ende, sus resultados son aplicables al caso de un suelo saturado con mucha mayor seguridad.

Se estudiaron tres tipos de errores potencialmente cometibles al emplear la sonda de neutrones como medidor de la humedad edáfica (Rouse y Wilson, 1971/72):

1. Error de conteo ( $E_{co}$ ) debido a variaciones al azar del flujo de neutrones. Puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$\text{donde: } E_{co} = (d^2 \cdot CR / t \cdot y^2)^{1/2}$$

d: número apropiado de desviaciones típicas para el nivel de probabilidad requerido. En este trabajo se tomó como nivel de probabilidad suficiente el 95%,

CR: relación del número de cuentas a un contenido de humedad dado,

y: pendiente de la curva de calibración para un contenido de humedad determinado,

t: tiempo utilizado para cada repetición a una misma profundidad (30 segundos).

2. Error de calibración ( $E_{ca}$ ), constante en 1,96 veces el valor del error de estimación de la curva de calibración.

3. Error de localización vertical ( $E_{lo}$ ), debido a la posición inadecuada de la fuente de emisión dentro del tubo de acceso. En el presente trabajo se tomó arbitrariamente un error de colocación de la fuente de +10mm. Entonces:

$$E_{lo} = \left[ |(Lz - Lz - 10)| + |(Lz - Lz + 10)| \right] / 2$$

donde:

$Lz$ ;  $Lz - 10$  y  $Lz + 10$  son los contenidos de humedad volumétrico a la profundidad;

$z$ ;  $z - 10$  mm y  $z + 10$  mm, respectivamente.

Finalmente, a una profundidad dada, el error total en el contenido de humedad volumétrico está dado por:

$$E_{hv} = (E_{co}^2 + E_{ca}^2 + E_{lo}^2)^{1/2}$$

## RESULTADOS Y DISCUSION

#### a) Método gravimétrico

La gran variabilidad observada en los trabajos de Smith (1982) y Szentivanyi (1984), pudo deberse especialmente a que en dichos trabajos la extracción de muestras fue realizada por numeroso personal no entrenado previamente en esa clase de tareas.

En el presente trabajo se realizó sobre dichos datos el análisis de varianza anteriormente detallado, obte-

niéndose diferencias significativas sólo entre mediciones de distinta profundidad.

Además, se estudió el número mínimo de muestras necesarias para los nive-

les de aceptabilidad del 10, 15 y 20% para ambas situaciones de suelo. En el Cuadro N° 1 se observan los resultados correspondientes.

**Cuadro N°1. Número mínimo de repeticiones necesarias utilizando el método gravimétrico, para 3 niveles de aceptación en suelos saturados e insaturados, de acuerdo al muestreo realizado por Smith-Szentivanyi y por del Barrio-Troha.**

profundidad (cm)	error aceptable (%)	Número mínimo de repeticiones			
		Smith-Szentivanyi suelo saturado insaturado		del Barrio-Troha suelo saturado insaturado	
0-9,9	10	30	20	6	6
	15	14	9	3	3
	20	8	5	2	2
10-19,9	10	11	36	6	7
	15	5	17	3	3
	20	3	10	2	2
20-29,9	10	3	27		9
	15	2	12		4
	20	1	7		3
30-39,9	10	10	22		11
	15	5	10		7
	20	3	6		4
40-49,9	10	8	8		6
	15	4	4		3
	20	2	2		2
50-59,9	10	4	9		3
	15	3	4		2
	20	2	3		1
60-69,9	10	5	16		2
	15	3	8		1
	20	2	5		1
70-79,9	10	3	14		2
	15	2	7		1
	20	1	4		1
80-89,9	10	2	13		2
	15	1	6		1
	20	1	4		1
90-99,9	10	5	13		3
	15	3	6		2
	20	2	4		1

A partir de dichos resultados puede detectarse que el número de repeticiones a realizar en las capas superiores de un suelo saturado es muy elevado; por lo tanto, se procedió a repetir el muestreo por ambos autores para las dos primeras profundidades, efectuándose 36 repeticiones en cada caso. En el Cuadro N° 1 puede visualizarse los resultados obtenidos.

Cuando se analizó el suelo insaturado, el número mínimo de repeticiones a realizar es muy grande a lo largo de todas las profundidades consideradas, repitiendo el ensayo ambos autores y efectuando 13 repeticiones para cada profundidad (Cuadro N° 1).

Es de hacer notar que tanto en un suelo saturado como insaturado la variabilidad del fenómeno estudiado aumenta significativamente para la profundidad de 30 a 50 cm. Esto es debido muy posiblemente a que en dicha zona se produce la transición abrupta entre el horizonte  $B_1$  y el  $B_{2t}$  variable en su profundidad de un punto de muestreo a otro.

Por otra parte, se verifica que la variabilidad del muestreo gravimétrico efectuado sobre un suelo saturado es generalmente menor que el efectuado sobre un suelo insaturado.

#### b) Sonda de neutrones

Al seguir la metodología propuesta por Rouse y Wilson (1972), se determinaron los tres errores potencialmente cometibles al utilizar la sonda de neutrones en determinaciones de humedad de suelo. Los resultados de los mismos, incluyendo el error total cometido en las mediciones, se encuentran detallados en el Cuadro N° 2.

Es de hacer notar que en orden decreciente los errores se dispondrían de la siguiente manera: error de calibración, error de localización y error de conteo.

El error total cometido oscila entre 1 y 1,5%. Es de destacar que al estar calibrado el instrumento por el método gravimétrico, los errores cometibles por el método radioisotópico son acumulativos al primero.

#### CONCLUSIONES

1. La variabilidad en las mediciones de humedad de suelo por el método gravimétrico es generalmente mayor en suelo insaturado que en saturado

**Cuadro N° 2. Errores de conteo, localización, calibración y totales en la medición de humedad del suelo por el método de la sonda de neutrones.**

profundidad (cm)	errores de medición (%)			
	conteo	localización	calibración	total
20-29,9	0,14	0,88	0,98	1,32
30-39,9	0,17	0,92	0,98	1,36
40-49,9	0,12	0,42	0,98	1,07
50-59,9	0,09	0,98	0,98	1,39
60-69,9	0,11	0,13	0,98	0,99
70-79,9	0,13	0,45	0,98	1,15
80-89,9	0,15	0,28	0,98	1,03
90-99,9	0,16	0,08	0,98	1,00

2. En ambas condiciones de humedad de suelo pueden establecerse dos etapas de muestreo: a) 0-40 cm y b) 40-100 cm de profundidad.

En suelo insaturado el número mínimo de muestras a tomar en la etapa (a) serían de 17, 8 y 5; en la etapa (b): 6, 3 y 2 para niveles de error aceptable del 10, 15 y 20%, respectivamente.

En suelo saturado el número mínimo de muestras a tomar en la etapa (a) serían 10, 5 y 3; en la etapa (b): 8, 4 y 2, respectivamente.

3. La variabilidad o error total cometido en las mediciones de humedad edáfica obtenidas con la sonda de neutrones oscila entre 1 y 1,5%.

4. De las tres fuentes de error probable por la aplicación del método radioisotópico, los mayores errores corresponden a la calibración y los menores a errores de conteo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a las autoridades del Observatorio Agrometeorológico de Castelar (INTA) por facilitar el uso de sus instalaciones y a los Ings. Agrs. J.A. Forte Lay y R.O. Rodríguez por la colaboración brindada en la realización del presente trabajo.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1) BELL, J.P., 1969. A new design principle for neutron moisture gauges: Wallingford neutron probe. *Soil Sci.* 108:160-164.
- 2) BELTCHER, D.J.; T.R. CUYKENDALL and A.S. SACK, 1950. The measurement of soil moisture and density by neutron and gamma-ray scattering. Civil Aero Adm. Tech. Dev. Rep. 127. Washington D.C.
- 3) FORTE LAY, J.A.; A. TROHA y M.M. VILLAGRA, 1985. Calibración de la sonda de neutrones para un Hapludol típico y un Argiudol vértico de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo*, 3(1-2):166-172.
- 4) HEWLETT, J.D.; J.E. DOUGLAS and J.L. CLUTTER, 1964. Instrumental and soil moisture variance using the neutron scattering method. *Soil Sci.* 97:19-24.
- 5) HOLMES, J.W., 1964. Aspects of soil moisture measurement with reference to arid soils. Div. Soil CSIRO Rep. 1:295-299.
- 6) ROUSE, W.R. and R.G. WILSON, 1972. A test of the potential accuracy of the water budget approach to estimating evapotranspiration. *Agric. Met.* 9:421-446.
- 7) SARTZ, R.S., 1972. Anomalies and sampling variation in forest soil water measurement by neutron probe. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:148-152.
- 8) SCHUDEL, P., 1983. The accuracy of measurements of soil-water content made with a neutron moisture meter calibrated gravimetrically in the field. *J. of Hydrology*, 62:355-361.
- 9) SINCLAIR, D.F. and J. WILLIAMS, 1979. Components of variance involved in estimating soil water content and water content change using a neutron moisture meter. *Austr. J. Soil Res.* 17:237-247.
- 10) SMITH, G.T., 1982. Variabilidad de la humedad del suelo y su efecto en la autenticidad de sus valores por el método gravimétrico. Trabajo de intensificación para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. 124 p.
- 11) SZENTIVANYI, M.C., 1984. Variabilidad de la humedad del suelo y su efecto en la autenticidad de sus valores por el método gravimétrico. Trabajo de intensificación para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires. 112 p.
- 12) VAN BABEL, C.H.M., 1958. Measurements of soil moisture content by the neutron method. *ARS* 41-42. Agric. Res. Serv.
- 13) VAN BABEL, C.H.M., 1962. Accuracy and source strength in soil moisture neutron probes. *Soil Sci.* 26:405-409.